

УДК523.44

© 1992 г.

Л. А. АКИМОВ, Д. Ф. ЛУПИШКО, В. Г. ШЕВЧЕНКО

О ЗАКОНЕ РАССЕЯНИЯ СВЕТА ПОВЕРХНОСТЯМИ АСТЕРОИДОВ. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЯРКОСТИ ПО ДИСКУ

Проведено численное моделирование зависимости амплитуды кривых блеска астероидов от фазового угла для различных законов рассеяния света. Анализ полученных результатов позволил выделить законы распределения яркости по диску, наиболее полно удовлетворяющие рассеивающим свойствам поверхностей астероидов.

Введение

Знание закона рассеяния света (ЗРС) поверхностями астероидов необходимо для самых различных целей:

- а) для изучения физических характеристик и геометрического строения поверхностей астероидов (альбедо, размер частиц, плотность их упаковки, показатель преломления вещества, характерный наклон рельефа и т. д.);
- б) для более точного определения формы и параметров вращения астероидов, включая ориентацию оси вращения в пространстве;
- в) для вычисления фазового интеграла, необходимого при расчете теплового режима поверхности и определении альбедо радиометрическим методом;
- г) для высокоточной астрометрии астероидов (например, с борта астрометрического спутника), поскольку отклонение центра видимого изображения от центра масс зависит от угла фазы и распределения яркости по диску астероида;
- д) для выполнения различного рода светотехнических расчетов освещенности для обеспечения работы аппаратуры вблизи и непосредственно на поверхности астероидов при осуществлении космических миссий к ним.

Однако изучение ЗРС поверхностями астероидов — задача довольно сложная, поскольку мы измеряем лишь интегральный блеск объекта и, как правило, в малом диапазоне фазовых углов. Тем не менее для астероидов, блеск которых изменяется с вращением, имеется возможность оценить вид функции распределения яркости по диску, исследуя зависимость амплитуды кривой блеска от фазового угла $A(\alpha)$, которая содержит информацию как о форме, альбедной неоднородности, геометрии наблюдения астероида, так и о законе рассеяния света его поверхностью. В статье В. Заппала и др. [8] было показано, что амплитуда кривых блеска астероидов возрастает линейно с углом фазы во всем диапазоне наблюдаемых углов (рис. 1), а наклон регрессии $A(\alpha)$ прямо пропорционален амплитуде кривой блеска при нулевом фазовом угле $A(0)$.

Настоящая работа посвящена численному моделированию зависимости $A(\alpha)$ для всех известных ЗРС с целью определения наиболее пригодного из них для описания распределения яркости по диску астероида.

Моделирование

Использовались следующие законы рассеяния света, которые запишем (с точностью до множителя, зависящего только от угла фазы) для силы света j , отраженного единичной площадкой однородной поверхности.

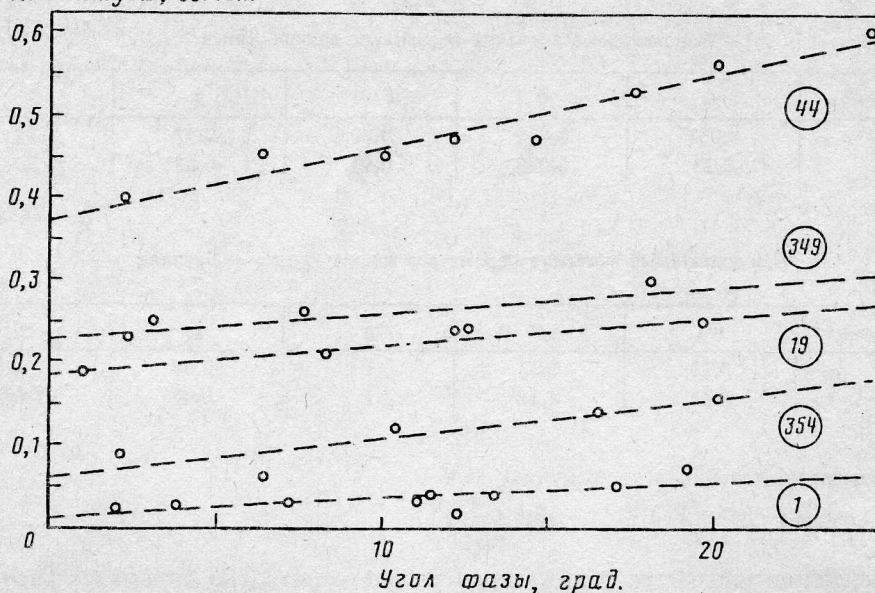


Рис. 1. Наблюдаемые зависимости амплитуды кривых блеска от угла фазы для астероидов 1 Церера, 19 Фортуна, 44 Низа, 349 Дембовска и 354 Элеонора, построенные по данным [7]

1. Закон Эйлера, наиболее часто используемый при изучении астероидов под названием «геометрический»:

$$j_1 = \cos \epsilon. \quad (1)$$

Отметим, что эта зависимость, строго говоря, не может быть законом рассеяния света, поскольку не удовлетворяет принципу взаимности Миннарта.

2. Закон Ламберта, обычно применяемый для поверхностей с высоким альбедо:

$$j_2 = \cos i \cdot \cos \epsilon, \quad (2)$$

где i , ϵ — соответственно углы падения и отражения света.

3. Закон Ломмеля — Зеелигера, чаще всего применяемый для описания шероховатых поверхностей с низким или средним альбедо:

$$j_3 = \frac{\cos i \cdot \cos \epsilon}{\cos i + \cos \epsilon}. \quad (3)$$

С некоторыми поправками этот закон фигурирует в большинстве формул для описания распределения яркости по диску планет.

4. Теоретический закон Акимова [1], полученный для предельно шероховатых поверхностей в масштабе мезорельефа. Он хорошо описывает распределение яркости по диску Луны:

$$j_4 = \left(\cos \varphi \frac{\pi}{\pi - \alpha} \cdot \cos \left[\frac{\pi}{\pi - \alpha} \left(\lambda - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \right). \quad (4)$$

Здесь φ и λ — фотометрическая широта и долгота точки соответственно. Связь с углами i , ϵ следующая:

$$\cos i = \cos \varphi \cdot \cos (\lambda - \alpha),$$

$$\cos \epsilon = \cos \varphi \cdot \cos \lambda.$$

Таблица 1

Используемые значения параметров закона Хапке

Астероид	ω_0	h	$S(0)$	g	θ
C-тип	0,037	0,025	0,20	-0,47	20°
S-тип	0,23	0,020	0,97	-0,35	20

Таблица 2

Используемые значения параметров закона Лумме — Боуэлла

Астероид	ω_0	D	q	g	ρ
C-тип	0,18	0,37	1	-0,04	1,17
S-тип	0,54	0,37	1	-0,07	1,17

5. Эмпирический закон Акимова [1]:

$$j_5 = \cos^p \varphi \left[\cos^p \left(\lambda - \frac{\alpha}{2} \right) - \sin^p \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right]. \quad (5)$$

При изменении параметра p этот закон удовлетворительно описывает распределение яркости по диску Луны ($p = 1$), результаты измерения образцов лунного грунта ($p = 1,1-1,3$) и светлых образцов земных пород ($p = 1,3-1,7$) и переходит в закон Ламберта при $p = 2$.

6. Закон Хапке, в последней модификации он представлен в работе [3]. В этом законе учтено влияние мезорельефа и многократное рассеяние света в поверхностном слое.

$$j_6 = \frac{\omega_0 \cos i_e \cos \varepsilon_e}{4\pi \cos i_e + \cos \varepsilon_e} \{ [1 + B(\alpha, h, S(0))] P(\alpha, g) + \\ + H(\cos i_e) H(\cos \varepsilon_e) - 1 \} S(i, \varepsilon, \psi, \theta), \quad (6)$$

где ω_0 — альbedo однократного рассеяния света частицей; B — функция, описывающая оппозиционный эффект; $P(\alpha, g)$ — функция Хенни — Гринстейна; $H(x)$ — функция многократного рассеяния ($x = \cos i, \cos \varepsilon$); $S(i, \varepsilon, \psi, \theta)$ — функция, учитывающая затенение; ψ — азимут между падающим лучом и отраженным; h — ширина оппозиционного пика; $S(0)$ — амплитуда оппозиционного пика; g — фактор асимметрии частицы; θ — средний наклон макрорельефа; i_e, ε_e — величины, определенным образом связанные с углами падения i и отражения ε .

Подробные аналитические выражения для функций закона Хапке содержатся в работе [3]. Исходные значения параметров данного закона для низкоальбедных (C-тип) и среднеальбедных (S-тип) астероидов, взятые из работы [4], представлены в табл. 1.

7. Закон Лумме — Боуэлла [3, 5]:

$$j_7 = \frac{\omega_0 \cos i \cos \varepsilon}{4\pi \cos i + \cos \varepsilon} [2\Phi_1 + \Phi_M], \quad (7)$$

где $\Phi_1 = \Phi_s(D)\Phi_R(q, \rho)P(\alpha, g)$ — функция, учитывающая однократное рассеяние света; $\Phi_s(D)$ — функция затенения; $\Phi_R(q, \rho)$ — функция шероховатости; Φ_M — функция, учитывающая многократное рассеяние; D — объемная плотность вещества; q — фактор заполнения поверхности лунками; ρ — параметр шероховатости.

Значения амплитуды кривых блеска однородного эллипсоида с осями 2:1,4:1

Закон	Фазовый угол (град)							
	0	3	6	9	12	18	24	30
Эйлера	0 ^m ,387	0 ^m ,387	0 ^m ,394	0 ^m ,399	0 ^m ,415	0 ^m ,422	0 ^m ,445	0 ^m ,447
Ламберта	0,640	0,640	0,639	0,639	0,646	0,667	0,684	0,696
Ломмеля — Зеелигера	0,387	0,391	0,398	0,404	0,417	0,452	0,487	0,516
Акимова (теорет.)	0,387	0,405	0,423	0,441	0,459	0,501	0,540	0,572
Акимова ($p = 1,1$)	0,418	0,430	0,442	0,453	0,469	0,507	0,541	0,567
Акимова ($p = 1,3$)	0,474	0,481	0,489	0,497	0,510	0,544	0,574	0,597
Хапке (C-тип)	0,387	0,408	0,424	0,437	0,456	0,498	0,535	0,565
Хапке (S-тип)	0,389	0,409	0,426	0,439	0,458	0,500	0,537	0,567
Лумме — Боуэлла (C-тип)	0,393	0,490	0,532	0,559	0,586	0,634	0,670	0,696
Лумме — Боуэлла (S-тип)	0,413	0,501	0,537	0,559	0,582	0,624	0,656	0,679

Подробные аналитические выражения для этих функций можно найти в работах [3, 5, 6]. Значения параметров закона (табл. 2) взяты из [6].

Кривые блеска получены численным интегрированием выражения

$$I = \iint_{\Omega} j_k(i, \epsilon, \alpha) ds,$$

где j_k — один из приведенных выше законов; Ω — область интегрирования.

Амплитуда, зв. вел.

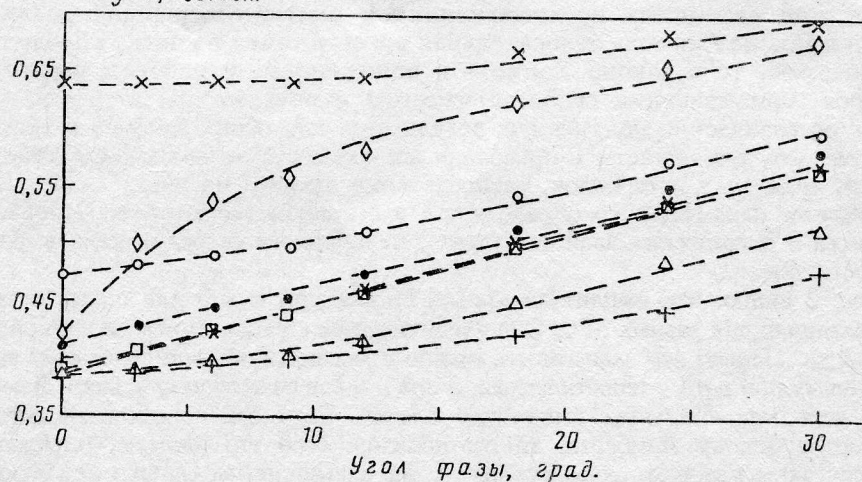


Рис. 2. Вычисленные зависимости амплитуды кривых блеска для однородной эллипсоидальной модели $a : b : c = 2 : 1,4 : 1$ и следующих законов рассеяния света: * — Акимов (теорет.), * — Акимов ($p = 1,1$), o — Акимов ($p = 1,3$), + — Эйлер, □ — Хапке, x — Ламберт, Δ — Ломмель — Зеелигер, ◇ — Лумме — Боуэлл

В качестве фигуры модели выбран однородный трехосный эллипсоид с соотношением осей 2:1,4:1, вращающийся вокруг наиболее короткой из них. Геометрия освещения и наблюдения модели соответствовала экваториальному аспекту, т. е. плоскость рассеяния совпадала с экваториальной плоскостью модели. Поверхность эллипсоида разбивалась на участки размером $5 \times 5^\circ$, для которых вычислялись углы падения, отражения и видимое альbedo при данном законе отражения.

В табл. 3 и на рис. 2 приведены результаты моделирования — зависимости амплитуды кривых блеска модели от фазового угла для различных ЗРС.

Обсуждение результатов и выводы

Анализируя полученные данные, нужно отметить следующее. Законы Эйлера (геометрический), Ламберта, Ломмеля — Зеелигера и Лумме — Боуэлла не удовлетворяют наблюдаемой линейной зависимости амплитуды кривой блеска от угла фазы для астероидов (см. [8] и рис. 1). Все они дают параболическую зависимость (первые три закона на рис. 2 аппроксимированы квадратичной параболой, а закон Лумме — Боуэлла — параболой третьей степени). Законы Ламберта, Ломмеля — Зеелигера и геометрический дают слишком малое изменение амплитуды с углом фазы в диапазоне α 0—10°. В то же время закон Лумме — Боуэлла, наоборот, показывает слишком быстрый рост $A(\alpha)$ в этом же диапазоне фазовых углов, что тоже не согласуется с результатами наблюдений.

Малое фазовое изменение амплитуды для планеты, отражающей по закону Ломмеля — Зеелигера, вызвано всплеском яркости на лимбе, увеличивающимся с углом фазы. На Луне, которая может считаться типичным представителем безатмосферных тел Солнечной системы, такого не наблюдается. Большой рост амплитуды с фазой при малых углах фазы для планеты, отражающей по закону Лумме — Боуэлла, связан с заметным падением яркости к полюсам, сильно увеличивающимся с углом фазы. На Луне подобного эффекта также нет.

Теоретический закон Акимова для предельно шероховатых поверхностей, закон Хапке и эмпирический закон Акимова для $p \leq 1,2$ вполне удовлетворяют наблюдениям как по условию линейности, так и по величине наклона. Первые два из этих законов дают практически одну и ту же зависимость, хотя получены при различных предположениях и имеют совершенно различный вид. Если в законе Акимова относительная яркость точки на диске определяется ее положением, то в законе Хапке — и положением, и набором физических параметров, описывающих свойства частицы и поверхности в целом. Столь разительное совпадение полученных результатов для обоих законов можно объяснить тем, что для планеты с предельно шероховатой поверхностью, такой как у Луны и, видимо, у астероидов, распределение яркости по диску слабо зависит от физических параметров, а определяется в основном геометрией. Основная же информация о физических свойствах такой поверхности сосредоточена в фазовой зависимости блеска.

Из рис. 2 видно, что амплитуда кривой блеска при $\alpha = 0$ для одной и той же фигуры различна для разных ЗРС. Она увеличивается с увеличением падения яркости к краю диска. Плавню эту зависимость можно проследить по эмпирическому закону, совпадающему при $p = 1$ с теоретическим, а при $p = 2$ переходящему в закон Ламберта, который дает максимальную амплитуду блеска. Если бы поверхность астероида удовлетворяла закону Ламберта, то соотношение осей его фигуры, определяемое фотометрическим методом, оказалось бы сильно завышенным. Однако нет оснований предполагать, что даже поверхности астероидов с самым высоким альбедо рассеивают свет ортотропно. Так, при лабораторном моделировании для образцов из окиси магния, альбедо которых близко к единице, мы получаем $p \approx 1,3$, если размеры неровностей рельефа значительно больше эффективной глубины проникновения света в рассеивающий слой [2]. Значение $p = 2$ соответствует лишь поверхностям, глубина проникновения света в которые гораздо больше высоты неровностей рельефа, что трудно ожидать для безатмосферных тел Солнечной системы.

Таким образом, для практических целей (см. Введение) мы рекомендуем использовать законы Акимова, в первую очередь теоретический, который намного проще и удобнее в использовании, чем улучшенный закон Хапке. Авторы предполагают в

следующей статье подробно исследовать возможность применения этих законов к конкретным астероидам различных типов, формы и аспектов наблюдения.

Список литературы

1. Акимов Л. А. Отражение света Луной. I // Кинематика и физика небесн. тел. 1988. Т. 4. № 1. С. 3—10.
2. Акимов Л. А. Исследование закона отражения света лунной поверхностью // Дисс. ... докт. физ.-мат. наук. Харьков, 1988. 206 с.
3. *Bowell E., Hapke B., Domingue D. et al.* Application of photometric models to asteroids // Asteroids. II / Eds Binzel R. P., Gehrels T., Matthews M. S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 524—556.
4. *Helmenstein P., Veeverka J.* Physical characterization of asteroid surfaces from photometric analysis // Asteroids. II. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 557—593.
5. *Karttunen H.* Modelling asteroid brightness variations. I. Numerical methods // Astron. Astrophys. 1989. V. 208. № 2. P. 314—319.
6. *Karttunen H., Bowell E.* Modelling asteroid brightness variation. II. The uninterpretability of light curves and phase curves // Astron. Astrophys. 1989. V. 208. № 2. P. 320—326.
7. *Lagerkvist C.-J., Barucci M. A., Capria M. T. et al.* Asteroid Photometric Catalogue // Ed. CNR, Rome, 1987. 1989.
8. *Zappala V., Cellino A., Barucci A. M. et al.* An analysis of the amplitude-phase relationship among asteroids // Astron. Astrophys. 1990. V. 231. № 2. P. 548—560.

Астрономическая обсерватория
Харьковского гос. университета

Поступила в редакцию
17.12.91

L. A. Akimov, D. F. Lupishko, V. G. Shevchenko

ON THE SCATTERING LAW OF ASTEROID SURFACES. THE BRIGHTNESS DISTRIBUTION LAW OVER THE DISK

Numerical modelling of the dependence of asteroid lightcurve amplitude on phase angle for different scattering laws was carried out. Analysis of the obtained results enabled us to select those laws of brightness distribution over the disk, which best of all satisfy the scattering properties of asteroid surfaces.